

爆破振动对双连拱隧道中墙的影响分析

时亚昕, 王明年, 李 强

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘 要: 在II、III级围岩条件下, 双连拱隧道常采用双侧全断面法施工。通过对双连拱隧道施工过程中的爆破振动进行三维数值模拟分析, 研究了双连拱隧道后行洞爆破施工对中墙的振动影响。结果表明: 双连拱隧道后行洞爆破对中墙有较大影响, 需采用相应的保护措施, 来减小爆破振动对中墙的扰动, 而临时支护将会被破坏。

关 键 词: 爆破振动; 双连拱隧道; 有限元; 中墙

中图分类号: U 451

文献标识码: A

Analysis of influence of blasting vibration on middle wall of a double-arch tunnel

SHI Ya-xin, WANG Ming-nian, LI Qiang

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The double-arch tunnel is built usually by the full-face method under the condition of surrounding rock masses grade II and grade III. Vibration of blasting has been simulated and analyzed by three-dimensional numerical simulation during construction process of the double-arch tunnel; and the influence of blasting vibration on the middle wall of the double-arch tunnel caused by the rear tunnel is studied. The result indicates that the blasting of the rear tunnel creates much effect on the middle wall of the double-arch tunnel; there is a great need for protection to reduce disturbance of middle wall caused by blasting vibration; and temporary support will be destroyed.

Key words: vibration of blasting; double-arch tunnel; 3D-FEM; middle wall

1 引 言

II、III级围岩条件下双连拱隧道通常采用双侧全断面法施工。连拱隧道中墙作为结构受力的关键构件, 在施工中多次转承围岩压力, 又受施工过程中爆破对其多次的振动冲击, 结构的安全性因受到较大的影响, 有可能被破坏而丧失承载能力。II级围岩初期支护为12 cm厚C20喷混凝土, 局部设置 $\Phi 25$ mm中空锚杆, 二次衬砌采用50 cm厚C25混凝土; III级围岩初期支护为15 cm厚C20喷混凝土, 拱部设置 $\Phi 25$ mm中空锚杆, 二次衬砌采用60 cm厚C25混凝土; 两种情况下中墙最小厚度均为150 cm。为了保证中墙在爆破振动下的结构及施工安全, 本文通过建立三维数值模型, 模拟了II、III级围岩条件下后行洞施工爆破对中墙的影响, 并根据计算结果, 对中墙提出相应的工程保护措施。

2 爆破荷载的确定

根据文献[1], 作用在结构上的爆破荷载可简化为具有线性上升段和下降段的三角形荷载。上升段时间为 $t_r = 12\sqrt{r^{2-\nu}} Q^{0.05} / K$ (s), 总作用时间为 $t_s = 84\sqrt{r^{2-\nu}} Q^{0.2} / K$ (s), 其中 K 为岩体的体积弹性模量(10^5 Pa), ν 为岩体的泊松比, Q 为炮眼装药量(kg), r 为对比距离^[2]。根据文献[3]爆破荷载的应力峰值 $P_{\max}$ 用如下公式计算:

$$P_{\max} = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2154}{Z^3} - 0.8034 \text{ kPa}$$

式中: $Z = R/Q^{1/3}$ 为比例距离; R 为炮眼至荷载作用面的距离(m)。

由于掏槽眼装药量大, 所以爆破振动一般由掏槽眼控制, II、III级围岩后行洞掏槽眼布置情况如图1、图2所示。

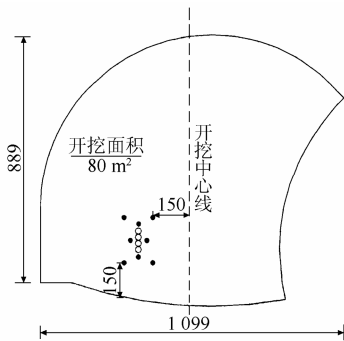
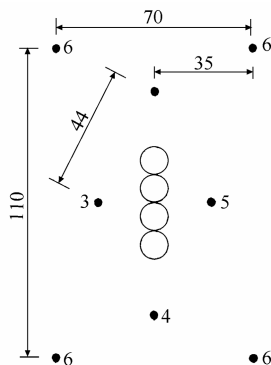


图1 后行洞炮孔布置图(单位: cm)

Fig.1 Blast hole arrangement plan of rear tunnel(unit: cm)



注: ①采用 $\Phi 102$ mm 的四中空螺旋直眼掏槽形式; ②装药孔钻孔深度 3.5 m, 炮眼直径 48 mm, 使用 $\Phi 42$ mm 的 2 号岩石硝铵炸药, 装药量 3.99 kg/孔; ③1, 3, 4, 5, 6 分别为毫秒雷管的段数。

图2 后行洞掏槽炮孔布置及起爆顺序图(单位: cm)

Fig.2 Breaking-in hole arrangement plan of rear tunnel and sequence blasting(unit:cm)

将图 1、图 2 所示的爆破参数代入以上 $P_{\max}$ 的表达式, 分别得到 II、III 级围岩不同段数的毫秒雷管引爆炸药时爆破荷载-时程曲线如图 3、图 4。

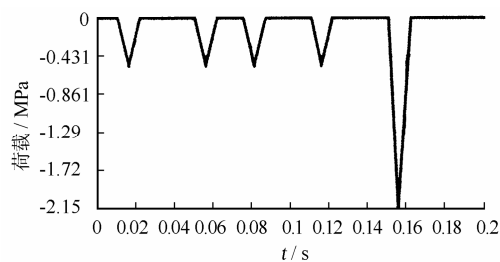


图3 II级围岩爆破荷载时间历程曲线

Fig.3 Time-history curve of blasting load of Second grade rock mass

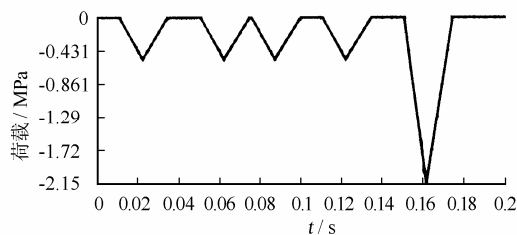


图4 III级围岩爆破荷载时间历程曲线

Fig.4 Time-history curve of blasting load of Third grade rock mass

3 计算参数选取

3.1 计算参数取值

混凝土材料在冲击荷载作用下, 极限抗压强度和弹性模量均随加载时间的缩短而增大, 当荷载作用时间从 100 s 减至 0.03 s 时, 强度和弹性模量分别提高 30%~56% 和 20%~25%。

岩石抵抗动荷载的动强度约为静强度的 5~10 倍。在冲击荷载下, 软岩的动抗压强度和动弹性模量将以近 10 倍计高于静载时的相应值。因此, 本次计算假定: 在爆炸荷载下, 围岩的弹性模量提高到原来的 5 倍; 衬砌的强度和弹性模量分别提高 50% 和 25%。计算选取的力学参数见表 1, 混凝土容许强度见表 2 (其中动载容许强度按照比静载容许强度提高 50% 计算)。

表1 计算选取的力学参数表
Table 1 The selecting mechanical parameters of calculation

项目	弹模 E /GPa	泊松比 ν	黏聚力 c /MPa	内摩擦角 φ /(°)	密度 ρ /g · cm ³
II 级围岩	22	0.23	2	50	2.6
III 级围岩	10	0.28	1	40	2.4
初期支护	21	0.2	/	/	2.5
二次衬砌	28.5	0.2	/	/	2.5
中墙	28.5	0.2	/	/	2.5

表2 静载和冲击动载作用下混凝土的强度(单位: MPa)
Table 2 The strength of concrete acting by static load and dynamic load (unit:MPa)

混凝土标号	静载容许强度		动载容许强度	
	抗压	抗拉	抗压	抗拉
C20	10.1	0.56	15.2	0.84
C25	12.5	0.65	18.8	0.98

3.2 阻尼

本次计算采用比较通用的瑞利 (Rayleigh) 阻尼, 相关取值结果见表 3。

表3 围岩阻尼系数及中央频率取值表
Table 3 Rock mass damping factor and spanning of middle damping

围岩级别	阻尼比 ξ	中央频率 f / Hz
II	0.01	10
III	0.01	7

3.3 隧道质点振速安全控制标准参考值

隧道质点振速安全控制标准参考值见表 4。

表 4 隧道质点振速安全控制标准参考值
Table 4 Control standard reference value of vibration velocity of tunnel's particle safety

地层	地质特征	振速控制值/cm·s ⁻¹	适用条件
中硬岩	Ⅲ级围岩整体性好, Ⅱ级围岩整体性差一些, 水工隧道	10	隧道内距掌子面一倍洞径处
硬岩	Ⅱ级围岩整体性好, 及Ⅱ级围岩以上, 交通隧道	15	
混凝土	C20 及以上	15	

3.4 中墙控制点

因为距爆源越近, 爆破振动效应较大, 因此, 本次计算选取的中墙控制点断面与后行洞掌子面平齐。根据中墙的结构受力特点, 选取应力、速度控制点如图 5、图 6。

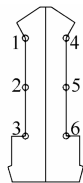


图 5 中墙应力控制点布置图
Fig.5 Control point arrangement plan of stress of middle wall

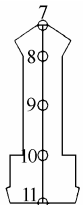


图 6 中墙速度控制点布置图
Fig.6 Control point arrangement plan of velocity of middle wall

4 围岩爆破振动计算分析

4.1 Ⅱ级围岩爆破振动计算结果

计算得到控制点的应力及速度-时程曲线如图 7~9。

计算得到中墙控制点应力极值、速度极值如表 5、表 6 所示。

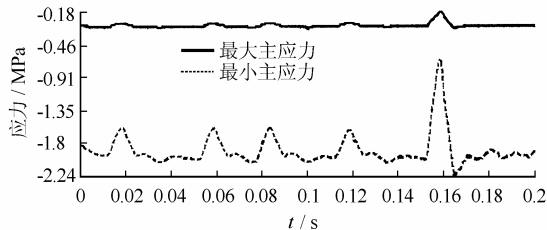


图 7 中墙 3 号控制点最大(最小)主应力-时间历程曲线
Fig.7 Max (or min) principal stress time-history curve of the third control point of middle wall

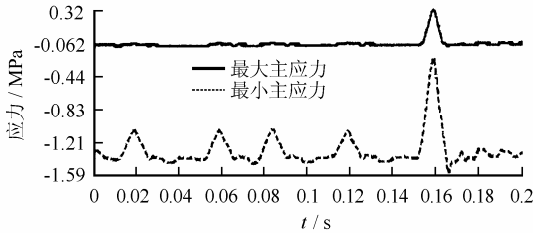


图 8 中墙 4 号控制点最大(最小)主应力-时间历程曲线
Fig.8 Max (or min) principal stress time-history curve of the fourth control point of middle wall

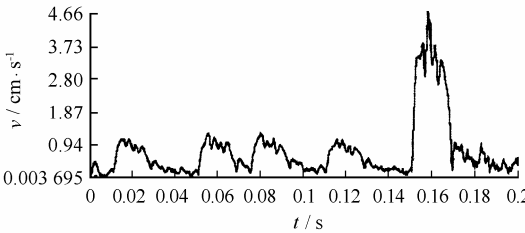


图 9 中墙 7 号控制点速度-时间历程曲线
Fig.9 Velocity's time-history curve of the seventh control point of middle wall

表 5 中墙控制点应力极值表
Table 5 Control point extreme stress of middle wall

应力	控制点					
	1	2	3	4	5	6
最大主应力/MPa	-0.065	0.003	-0.018	0.321	0.208	0.147
最小主应力/MPa	-1.554	-1.574	-2.24	-1.591	-1.075	-1.081

表 6 中墙控制点速度极值
Table 6 Control point extreme velocity of middle wall

参数点	控制点				
	7	8	9	10	11
速度/cm·s ⁻¹	4.663	3.667	3.662	3.188	2.657

根据图 7~9 及表 5、表 6 的分析知:

(1) 爆破振动对隧道中墙的危害影响主要由最大单响装药量确定。

(2) 中墙各控制点最大主应力如表 5, 其中最大主拉应力仅为 0.321 MPa, 小于 C25 混凝土的允许动抗拉强度, 安全系数可达 3, 若由主拉应力控制时, 可以保证中墙的安全; 其中最大主压应力值为 -2.24 MPa, 小于 C25 混凝土的允许动抗压强度, 安全系数可达 6.8。若由主压应力控制时, 可以保证中墙的安全。

(3) 中墙各控制点振速如表 6, 其中最大振动速度为 4.663 cm/s, 发生在中墙与二次衬砌拱部相接部位, 满足要求。

4.2 Ⅲ级围岩爆破振动计算结果

计算得到控制点的应力及速度-时程曲线如图 10~12。

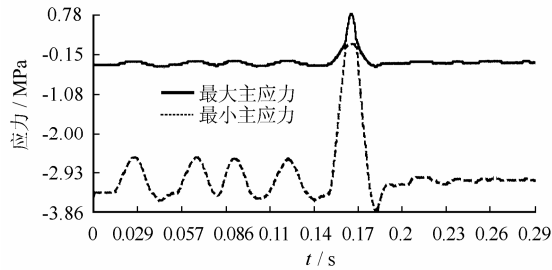


图 10 中墙 3 号控制点最大(最小)主应力-时间历程曲线
Fig.10 Max (or min) principal stress time-history curve of the third control point of middle wall

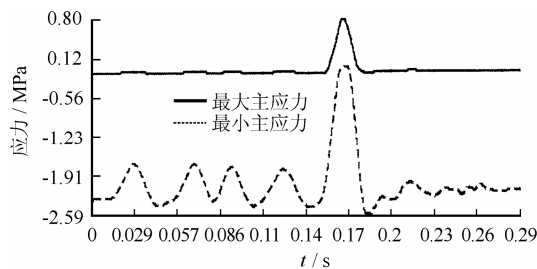


图 11 中墙 4 号控制点最大(最小)主应力-时间历程曲线
Fig.11 Max (or min) principal stress time-history curve of the fourth control point of middle wall

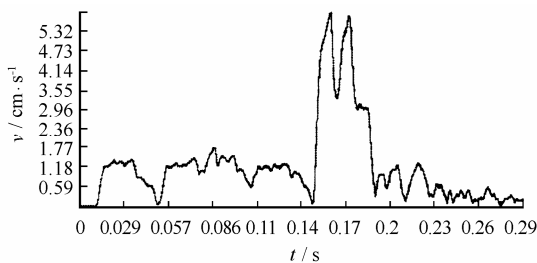


图 12 中墙 7 号控制点速度-时间历程曲线
Fig.12 Velocity's time-history curve of the seventh control point of middle wall

计算得到中墙控制点应力极值、速度极值如表 7、表 8 所示。

表 7 中墙控制点应力极值表

Table 7 Control point extreme stress of middle wall

控制点	1	2	3	4	5	6
最大主应力/MPa	0.227	0.212	0.779	0.798	0.383	0.251
最小主应力/MPa	-1.491	-2.292	-3.856	-2.586	-1.541	-1.247

表 8 中墙控制点速度极值表

Table 8 Control point extreme velocity of middle wall

控制点	7	8	9	10	11
速度/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	5.911	4.585	3.682	3.536	3.733

由图 10~12 及表 7、表 8 可知:

(1) 爆破振动对隧道中墙的危害影响主要是由最大单响装药量确定。

(2) 中墙各控制点最大主应力如表 7, 其中最大主拉应力为 0.798 MPa, 小于 C25 混凝土的容许动抗拉强度, 安全系数可达 1.23。若由主拉应力控制时, 可以保证中墙的安全, 最大主压应力值为 -3.856 MPa, 小于 C25 混凝土的容许动抗压强度, 安全系数可达 3.9; 若由主压应力控制时, 可以保证中墙的安全。

(3) 中墙各控制点振速及安全系数如表 8, 其中最大振动速度为 5.911 cm/s, 发生在中墙与二次衬砌拱部相接部位, 满足要求。

4.3 II、III级围岩条件下爆破振动对临时支护的影响分析

两种围岩条件下, 爆破振动对中墙临时支护(即先行洞初期支护的喷射混凝土)产生的最大振动速度见图 13、图 14。

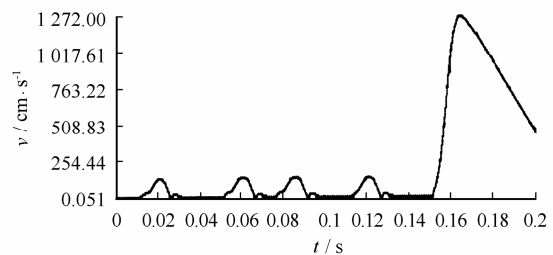


图 13 II级围岩条件下爆破振动对中墙临时支护的产生的最大振动速度

Fig.13 Maximum velocity of temporary support of middle wall caused by blasting vibration under the second grade rock mass

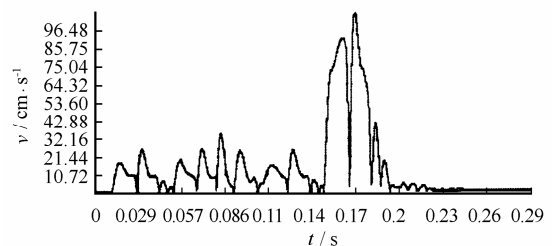


图 14 III级围岩条件下爆破振动对中墙临时支护的产生的最大振动速度

Fig.14 Maximum velocity of temporary support of middle wall caused by blasting vibration under the third grade rock mass

由图 13、图 14 可知, II、III级围岩条件下临时支护结构控制点的最大振动速度分别达到 1272 cm/s 和 107.2 cm/s, 控制点振动速度已远远超过控制标准。在爆破荷载作用下, 临时支护会破坏而丧失其承载能力, 甚至会开裂破坏, 因此, 需在中墙

迎爆侧设置挡板对其加以保护。

5 结 论

通过对连拱隧道爆破施工过程中的分析可得如下结论:

(1) II、III级围岩后行洞爆破施工对中墙产生的最大振动速度分别为 4.663 cm/s 和 5.911 cm/s, 均发生在中墙与二次衬砌拱部相接部位, 此时结构是安全的。在同等条件下, 围岩的弹性模量 E 对振速的影响比较敏感, 围岩越弱, 爆破振速越大; 围岩越硬, 爆破振速越小, 这充分证明了在软弱围岩地质条件下采用弱爆破或机械开挖施工的合理性。

(2) 从速度-时程和应力-时程中均可得出: 应力波最初以冲击波的形式向外传播, 但随着波阵面不断向外传播, 波峰值逐渐降低, 冲击波发生衰减, 逐渐从强冲击波衰减成弹性波和地震波。

(3) II、III级围岩后行洞爆破施工对中墙产生的最大主应力分别为 0.321 MPa 和 0.798 MPa, 均发生在先行洞侧中墙上部变截面处, 最小主应力分别为 -2.24 MPa 和 -3.856 MPa, 均发生在后行洞侧中墙下部变截面处。此时 II、III级围岩条件下中墙是安全的。在同等条件下, 围岩越弱, 爆破振动产生的中墙的应力越大。

(4) II、III级围岩后行洞爆破施工对临时支护产生的最大振动速度分别为 1 272 cm/s 和 107.2 cm/s。因此, 临时支护在爆破荷载作用下, 会丧失承载能力, 甚至会开裂破坏, 需在中墙迎爆侧设置挡板, 或在中墙施工完毕后, 不必马上拆除临时支护, 而是在正洞二次衬砌施工时才拆除, 以确保中墙的安全。

参 考 文 献

- [1] 刘国华, 王振宇. 爆破荷载作用下隧道的动态响应与抗爆分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(2): 204—209.

LIU Guo-hua, WANG Zhen-yu. Dynamic response and blast-resistance analysis of a tunnel subjected to blast loading[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2004, 38(2): 204—209.

- [2] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 177—179.
- [3] HSIN Yu Low, HONG Hao. Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading [J]. **Structural Safety**, 2001, 23: 157—178.
- [4] 严东晋, 钱七虎, 唐德高. 爆炸冲击震动下隔震系统设计的可靠性[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 23—28.
YAN Dong-jin, QIAN Qi-hu, TANG De-gao. Reliability of isolation system under blast shock and vibration[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2001, 34(3): 23—28.
- [5] 言志信, 王永和, 江平, 等. 爆破地震测试及建筑结构安全标准研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 907—1911.
YAN Zhi-xin, WANG Yong-he, JIANG Ping, et al. Study on measurement of blast-induced seism and building safety criteria[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(11): 1 907—1 911.
- [6] 杨年华, 刘慧. 近距离爆破引起的隧道周边振动场[J]. 工程爆破, 2000, 6(2): 6—9.
YANG Nian-hua, LIU Hui. Vibration field at tunnel contour induced by a close-in blasting[J]. **Engineering Blasting**, 2000, 6(2): 6—9.
- [7] 言志信, 吴德伦, 王漪, 等. 地震效应及安全研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 201—203.
YAN Zhi-xin, WU De-lun, WANG Yi, et al. The study of blast vibration effect and safety[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23 (2): 201—203.

书 讯

建设工程施工新技术应用案例 (“十·五” 期间)

建筑科学类/范庆国主编/小 16 开/800 千字/640 页/精装/估价: 90 元/2007 年 4 月出版/ISBN:978-7-112-08973-4

本书是上海建工集团“十五”期间在建设工程中新技术应用案例汇编, 主要内容有: 第一篇地基基础工程; 第二篇结构施工工程; 第三篇施工机具; 第四篇道路、桥梁、隧道与特种工程; 第五篇装饰装修工程。读者对象: 工程管理、技术人员。

(摘自 新华书目报·科技新书目)